

# 连续纤维增强的金属基复合材料 部件在航空涡扇发动机上的应用

Application of Continuous Fiber Reinforced Metal Matrix Composite Component  
on Turbofan Aeroengine

中航工业沈阳发动机设计研究所 梁春华



梁春华

研究员。主要研究方向为航空发动机情报。曾先后荣获“九五”、“十五”国防科技情报研究成果奖 3 等奖各 1 项,原中国一航 95 优秀科技情报成果 1 等奖和 3 等奖各 1 项,所科技进步 2 等奖 3 项,所科技进步 3 等奖 14 项,发表论文 30 多篇。

随着气动热力学、结构力学和材料科学等的飞速发展,“较高的性能、良好的经济性、极好的环保特性和很高的可靠性”已经成为大涵道比涡扇发动机研制的主要目标,而“较高的推重比、较低的油耗、较少的信号特征、极高的可靠性”已经成为小涵

道比加力涡扇发动机研制的主要目标。研究表明,在不改变目前航空涡扇发动机结构布局的前提下,上述目标要想取得突破,创新的材料方案是极其关键的因素。

连续纤维增强 MMC 在航空涡扇发动机部件上的应用,不仅是复合材料本身发展的需要,更是航空涡扇发动机增推减质的需要。MMC,特别是钛基和钛铝基复合材料已经成为航空发动机技术先进国家在航空涡扇发动机中低温部件上广泛探索研究的结构材料。随着材料制备和加工技术的发展和成熟,MMC 的性能将得到不断提高,相信在航空涡扇发动机部件的应用将在不久的将来能够实现。

道比加力涡扇发动机研制的主要目标。研究表明,在不改变目前航空涡扇发动机结构布局的前提下,上述目标要想取得突破,创新的材料方案是极其关键的因素。

由于具有优良的比强度、比刚度、耐高温性、结构稳定性和质量等性能,MMC (Metal Matrix Composites,金属基复合材料)已经成为航空涡扇发动机高性能中温部件的重要候选材料。多年来,世界知名的航空发动机设计与制造商针对 MMC,特别是连续纤维增强的 MMC 在航空涡扇发动机压气机转子/静子叶片、整体叶环、机匣、低压轴、排气喷管作动筒等零部件上的应用,已经进行了广泛的探索和研究,并取得了很大的进展。

## 连续纤维增强的 MMC 在航空 涡扇发动机部件上的应用

早在 20 世纪 60 年代初期,连续纤维增强的 MMC 在航空涡扇发动机上的应用研究工作就已经开始,40 多年来已经取得了显著的进展,目前在有些领域已经接近实际应用的水平。

### 1 连续纤维增强的 MMC 在风扇 / 压气机叶片上的应用

连续纤维增强的 MMC 在航空涡扇发动机风扇 / 压气机转子叶片上的应用研究始于 20 世纪 60 年代,于 70 年代中期完成可行性验证,80 年代以来取得了很大进展。

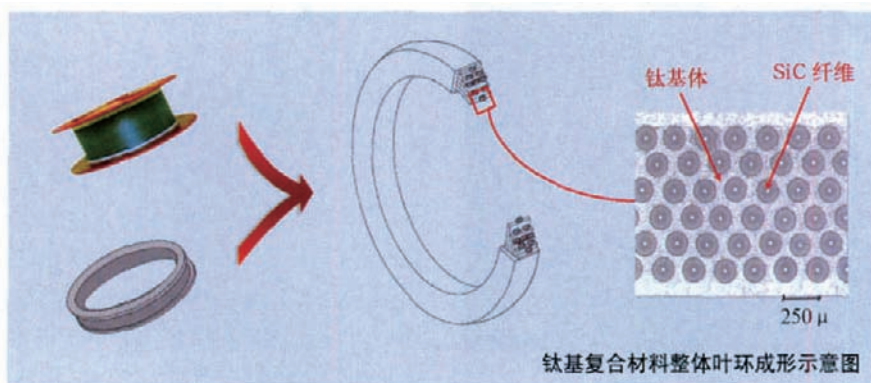
(1) GEAE 公司。

20 世纪 80 年代后期,GEAE 公

司开发了超塑成形/扩散连接工艺,并制造了碳化硅纤维 SCS-6 增强的 Ti-6-4 基复合材料风扇叶片。该叶片的试验台试验和旋转地坑试验结果表明,其满足了预计的结构完整性要求,制造工艺合理,但是存在叶片质量太大和 1 阶弯曲频率太低的问题。为此,对该叶片进行了优化和

维增强的 TiMMC 风扇/压气机转子叶片,90 年代初曾尝试在 F119 发动机上采用与汉密尔顿标准公司联合开发的 TiMMC 风扇叶片,也曾尝试在美国 IHPDET 研究计划 XTC66 核心机第 2 和第 3 级高压压气机(共 5 级)上采用 TiMMC 叶片。

(3) 其他。



改进,并进行了发动机试验验证。虽然,没有见到该叶片进一步发展的报道,但是,根据 TiMMC 涡轮发动机部件联合体(TMCTECC)研究计划的进展,可以推知 GEAE 公司在这方面已经取得了很大的进展。

TMCTECC 研究计划由美国政府投资,于 1994 年 8 月起动,是由 GEAE、P·W 公司、Textron Specialty Materials、Atlantic Research Corporation、3M 和 Howmet 公司组成。它的研究目标是通过开发连续丝带成形工艺、成束丝带成形工艺、电子束/物理气相沉积(EBPVD)工艺等,在 IHPDET 研究计划下开发和验证 TiMMC 部件,并将其推广应用到运输机大涵道比涡扇发动机和 F110、F119、F120 等战斗机小涵道比涡扇发动机上。目前,GEAE 公司开发并验证了 MMC 风扇转子叶片,并计划应用到 F110 和 F414 推力增大大型发动机上。

(2) P·W 公司。

P·W 公司于 20 世纪 60~70 年代对硼纤维增强的铝基复合材料风扇转子叶片进行了研究和试验验证,80 年代以来重点开发了连续纤

为了适应发动机高性能和高推重比的要求,强调轻质量和高温能力的 IHPDET 研究计划较多地研究了镍铝和钛铝金属间化合物基复合材料发动机部件。高强度纤维增强的斜方晶的钛铝基复合材料压气机后转子,满足了 IHPDET 研究计划第 2 阶段的质量减轻 40%、出口温度提高 200° F (111°C) 的目标。在部件和发动机结构评估研究计划(CAESAR)中,研究并验证了质量轻且耐温能力更高的  $\gamma$  钛铝压气机外环和叶片。

此外,在 AMG 研究与研制计划中,日本采用超塑成形和等热铸造工艺加工了 TiMMC 高压压气机叶片。MTU 公司与德国航天中心(DLR)和 Chemnitz 技术大学的材料与冲击工程研究所(LWM)也合作研究了低压压气机整体叶盘的碳化硅增强的 TiMMC 转子叶片。

## 2 连续纤维增强的 MMC 在压气机整体叶环上的应用

由于去掉了轮盘部分,加之由较轻的支撑结构、较小的陀螺力矩或较低的轴承载荷导致的质量大大减轻(最多可减轻 70%),MMC 整体叶环结构得到了世界知名的航空发动机

设计与制造商的高度关注和大力开发。

美国连续纤维增强的 MMC 在压气机整体叶环上的应用研究工作始于 20 世纪 80 年代。美国空军、加雷特公司、AADC 公司、GEAE 公司和 P·W 公司在可行性研究、制造工艺、试验验证等方面开展了大量的工作。

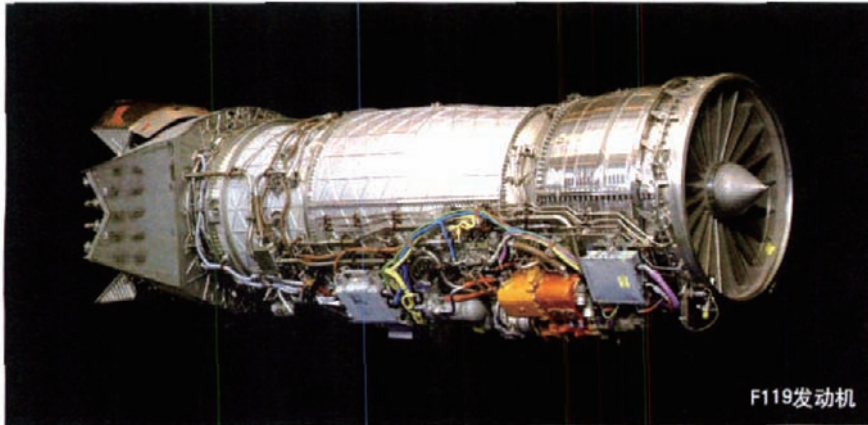
20 世纪 90 年代初,在 IHPDET 研究计划下,AADC 公司设计和试验了 XTC-16 系列核心机的 4 级压气机的第 3 和第 4 级采用碳化硅增强的 TiMMC 整体叶环。其制造工艺:首先采用普通的钛合金锻造成毛坯,然后加工出叶片,并在环内侧加工出 V 环槽,在槽内装入由碳化硅纤维增强的钛合金插入件,并用普通钛合金覆盖在插件上,再进行热等静压,使之复合成一体。该整体叶环转子的质量大大减轻,如第 3 级整体叶环转子的质量只有 4.5kg 左右,而常规镍基合金制造的同样转子的实际质量为 25kg。

20 世纪 90 年代中期,在 IHPDET 研究计划下,GEAE 公司开发和验证了 TiMMC 压气机整体叶环。该公司和 AADC 公司合作研制的 ATEGG 验证机 XTC76 / 2 核心机 5 级高压压气机采用外圈增强的 MMC 的压气机转子,满足了高转速和高温的要求,减轻了盘的质量,降低了制造费用,改善了可维护性。

另外,IHPDET 研究计划 XTC66 核心机采用了增强的 TiMMC 压气机盘连接件。IHPDET 研究计划第 2 阶段新核心机压气机将采用高温钛合金 Ti1100 的整体叶环,TiAl 金属间化合物制造压气机静子。这样,压气机的耐热性能将提高到 700~800°C,结构质量将减轻 50%,阻燃性能提高。Ti1100 复合材料整体叶环结构的制造技术尚未见报道。

欧洲国家的航空发动机公司也

大量开发了复合材料整体叶环结构。MTU 公司开发的碳化硅纤维增强的 TiMMC 的整体叶环转子,已完成了低循环疲劳旋转试验,计划应用到推重比达到 15 ~ 20 的 EJ200 改进型发动机的前 2 级高压压气机



F119发动机

上。SNECMA 公司也采用基体涂覆纤维工艺制造了碳化硅纤维增强的 TiMMC 压气机整体叶环插件。

在 AMG 和 EPR 研究计划中,日本也开展了 MMC 整体叶环的制造和试验验证工作。在 AMG 研究计划下,采用热压和等静压热压方法加工了 MMC 整体叶环,并成功地进行了突爆试验和循环旋转地坑试验。在 EPR 计划下,采用新开发的纤维缠绕与喷涂工艺和基体涂覆单丝带工艺,制造了碳化硅纤维 (SCS-6) 增强的钛基 (SP-700, Ti<sub>4.5</sub>Al<sub>13</sub>V<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>Mo) 复合材料风扇整体叶环转子,并成功地完成了拉伸试验和超转试验验证。结果表明,采用基体涂覆单丝带工艺制造的整体叶环,在拉伸强度和变形能力方面都取得了明显进展,故淘汰了纤维缠绕与喷涂工艺。

### 3 连续纤维增强 MMC 在发动机低压轴上的应用

20 世纪 70 年代末至 80 年代初,GEAE 公司和特里达因 CAE 公司完成了 MMC 发动机轴的可行性研究。80 年代末至 90 年代初,美国陆军为 GEAE 和达信集团来科明公司提供资金,开发 MMC 低压轴。

GEAE 公司 F110 发动机低压轴采用了 SCS-6 纤维增强的 Ti6-4 基复合材料制造,纤维体积含量为 35%,沿各种方向铺层 22 层。该低压轴质量减轻 68kg,其中包括轴本身质量减轻 9kg。20 世纪 90 年代,GEAE

公司在 TMCTECC 研究计划下,在 XTC-76 JTDE 发动机上验证了碳化硅增强的 Ti MMC 低压轴。该低压轴的长度为 48in (121.92cm),直径为 6in (15.24cm),质量较 Incol 合金轴的轻 30%,刚度较钛合金轴的高 40%,寿命也有所延长。

另外,在 VITAL 计划下,欧洲国家也在开发和验证 MMC 的发动机轴技术。

### 4 连续纤维增强 MMC 在排气系统作动筒活塞等部件上的应用

20 世纪 90 年代,在 TMCTECC 研究计划下,P·W 和 GEAE 等公司开发并验证了 MMC 的排气系统作动筒活塞、同步环和收敛调节片连杆等部件。

碳化硅纤维增强的 TiMMC 扩散喷管作动筒活塞是为 F119 发动机研制的,是 F-22 战斗机上的第 1 个 TiMMC 零件,目前已经完成了发动机地面累积试验。结果表明,其承载能力比预计的使用载荷高出 1 倍。该活塞替代不锈钢活塞,本身质量可以减轻 40%,同时可以成倍地减轻机头的平衡质量(战斗机后部的质量减轻 0.5g 的质量,机头就可以减轻 1kg 的平衡质量)。该活塞长

为 305mm 左右,杆部直径为 50mm,头部直径为 100mm,质量与钛的一样,强度与钛的也一样,但刚度比钛的高。其制造工艺是:在鼓筒上缠绕 1 层 SiC 单丝,在丝上绕上 1 层钛丝,用胶结剂将 2 种材料连结,制成薄板,然后,卷绕在 1 个钛心轴上,绕 15 层;头部用 1 个钛筒形件形成。活塞外部涂覆有 1 层涂层。毛坯在 455℃ 加热,以排除其中的杂质,然后加以密封,在 955℃、100MPa 压力下进行热等静压。

另外,在 IHPTET 研究计划下,GEAE 公司研制了 F110 发动机的 TiMMC (Trimarc-2 增强的 Ti<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>Sn<sub>4</sub>Zr<sub>2</sub>Mo) 排气喷管作动筒连杆。该连杆替代了原 Inconel 718 连杆,使抗弯曲强度提高 50%,质量减轻 2.0kg,且使研制风险降低。

### 5 连续纤维增强 MMC 在发动机机匣上的应用

20 世纪 90 年代初,为了满足 IHPTET 研究计划第 2 阶段的目标,GEAE 公司开展了 MMC 发动机机匣的设计与制造等工作。这些工作是利用美国空军的外骨架结构 (Exoskeletal) 研究计划和 GEAE 公司独立研究与研制计划的经费进行的。为了设计 1 个结构效率高的航空发动机外机匣,对作用在机匣结构件上的各种独立的或组合的载荷的影响、纤维体积百分比的影响、部件的刚度与强度需求、不同结构形式的影响,以及有关可靠性 / 维修性 / 现场维护等进行了研究,还对 MMC 的薄金属片-纤维-薄金属片叠加工艺和等离子体喷涂工艺进行了研究。

### 连续纤维增强 MMC 发展趋向

经过多年的发展,连续纤维增强的 MMC 已经被美国、英国、法国等航空发动机技术先进国家广泛应用于航空涡扇发动机的中温部件上。

#### 1 中高温 MMC 的应用前景

铝基复合材料的使用温度较低,最有潜力应用的部件主要是航空涡扇发动机的低压压气机和外涵部件。为了减轻质量,尽管采用铝基复合材料替代钛合金是一种不错的选择,但是,由于其成本目前仍然较高,而树脂基复合材料的工艺成熟、成本较低且耐温度能力不断提高,因而,铝基复合材料在航空涡扇发动机上的应用潜力不容乐观。

碳化硅纤维增强的 TiMMC 具有比强度高、比刚度高,使用温度高及抗疲劳和蠕变性能好等优点,如德国研制的 SCS-6/IM1834 复合材料的抗拉强度达 2200MPa,刚度达 220GPa,而且具有极为优异的热稳

已经十分明朗。

因具有密度低、刚度高、高温强度高和防火能力强等特点,金属间化合物(钛铝化合物和镍铝化合物)基复合材料早已被列为先进航空涡扇发动机的候选材料。随着美国和欧洲对高强度纤维增强的钛铝和镍铝基复合材料发动机压气机叶片等部件的不断开发和验证,这些材料也将应用到未来的航空涡扇发动机上。

## 2 单长丝缠绕增强的复合材料发展前景

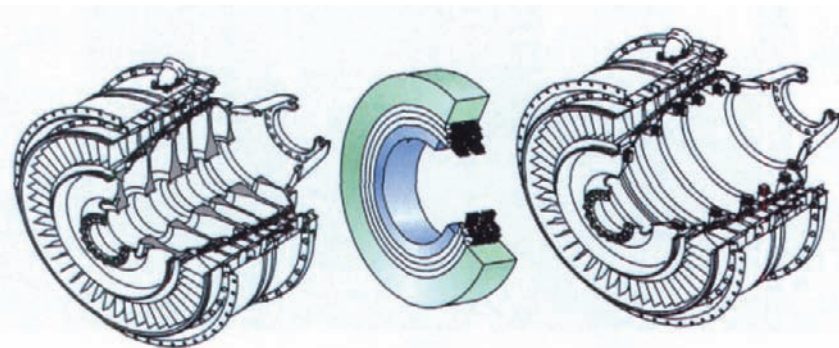
由于在高温下沿纤维方向具有很高的比强度和比刚度,单长丝增强的复合材料应用于航空涡扇发动机部件上的优势明显,如采用连续单

性,MMC 制造的静态结构件往往具有极其复杂的应力场,并且很难设计和制造。与 MMC 有潜力应用的低压轴、静子叶片、机匣、尾部结构和作动杆等部件相比,人们针对整体叶环和转子叶片等部件开展的探索研究和应用验证工作较多,同时进展也较快。美国 P·W 公司等开发的 TiMMC 整体叶环已在 IHPTET 研究计划 XTC-65 验证机上成功地进行了验证,能够满足性能要求。GEAE 公司和 ADC 公司合作研制的 ATEGG 验证机 XTC76 / 2 核心机 5 级高压压气机采用外圈增强的 MMC 的压气机转子,满足了高转速和高温的要求,减轻了盘的质量,降低了制造费用,改善了可维护性。欧洲 4 国研制的碳化硅增强的钛合金复合材料的整体叶环转子已完成低循环疲劳旋转试验,准备应用到推重比达到 15 ~ 20 的 EJ200 改进型发动机的前 2 级高压压气机上。

## 结束语

连续纤维增强 MMC 在航空涡扇发动机部件上的应用,不仅是复合材料本身发展的需要,更是航空涡扇发动机增推减质的需要。MMC,特别是钛基和钛铝基复合材料已经成为航空发动机技术先进国家在航空涡扇发动机中低温部件上广泛探索研究的结构材料。随着材料制备和加工技术的发展和成熟,MMC 的性能将得到不断提高,相信在航空涡扇发动机部件的应用将在不久的将来能够实现。

在纤维增强树脂基复合材料应用于航空涡扇发动机部件方面,中国已经开展了一些开发和验证工作,但是较国外先进水平还有很大差距。因而,很好地借鉴国外已经验证的先进材料和制造技术,充分地吸取国外成功的管理经验,对加快中国 MMC 航空涡扇发动机部件的开发和应用具有重要的意义。(责编 依然)



钛基复合材料整体叶环

定性,在 700℃ 温度暴露 2000h 后力学性能不降低。采用 TiMMC 替代传统钛合金制造压气机转子叶片,在无需增加叶片厚度或质量的前提下,能够增加叶片刚度,使得叶片性能调整范围增大;可以改变叶片的共振频率,从而将有害的振型排除在发动机工作范围之外;可以使压气机质量减轻 40% 左右。采用 TiMMC 整体叶环替代压气机盘,可以使压气机结构质量减轻 70%。采用 TiMMC 发动机轴替代传统发动机轴,可以使发动机质量大大减轻。另外,这些部件已经被美国和欧洲国家等在先进计划验证机和在研发发动机上进行了广泛的验证,因而,未来航空涡扇发动机风扇/压气机的转子叶片、整体叶环、低压轴采用 MMC 制造的趋势

根碳化硅长丝增强的 TiMMC 制造的压气机整体叶环转子可以减轻质量 70%,因而,这种复合材料在 21 世纪高推重比发动机中的应用具有很大的潜力。未来发动机的低压压气机转子叶片和静子叶片、压气机和涡轮整体叶环,以及涡轮轴、压气机机匣也将广泛采用这种复合材料制造。通常发动机的低温部件,如轴和机匣以及低压转子等采用单长丝增强的 TiMMC 制造,而高温涡轮部件则用单长丝增强的金属间化合物基复合材料制造。目前,正在原型发动机上对单长丝增强的 MMC 部件的性能进行评估。

## 3 连续纤维增强 MMC 转动部件的发展与应用前景

由于呈现出很明显的各向异